Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo

Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil

Ariadna Escalante Rebolledo[1], Guadalupe Pérez López[2], Claudia Hidalgo Moreno[3‡], Jorge López Collado[3], Julio Campo Alves[4], Esteban Valtierra Pacheco[3] y Jorge D. Etchevers Barra[3]

[1] Universidad Veracruzana. Lomas del Estadio s/n, Zona Universitaria. 91000 Xalapa Enríquez, Veracruz, México.
[2] Colegio de Postgraduados, Campus Campeche. Carretera Haltunchén-Edzná km 17.5, Sihochac. 24450 Champotón, Campeche, México.
[3] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.
[‡] Autora responsable (hidalgo@colpos.mx)
[4] Instituto de Ecología, UNAM. Ciudad Universitaria, Coyoacán. 04510 Ciudad de México, México.

RESUMEN

Los suelos de México exhiben una fuerte degradación física, química y biológica. Existen tecnologías para contrarrestar la degradación del suelo, ayudar a recuperar su fertilidad y secuestrar carbono, como la aplicación de biocarbón *(biochar*), que es un subproducto de la pirólisis de biomasa residual. Existen experiencias positivas derivadas de la aplicación de biocarbón al suelo, que generan una mejoría en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que se traduce en un aumento de la productividad de los cultivos. El biocarbón, por ser una forma recalcitrante de carbono, actúa como reservorio de larga duración de este elemento, retardando su retorno a la atmósfera como CO_2, situación que contribuye a mitigar el cambio climático. Un beneficio adicional es que la materia prima para su producción proviene de residuos orgánicos, que a menudo causan problemas de contaminación ambiental. La generación de biocarbón y su aplicación es una alternativa tecnológica que ha sido poco o no empleada en México. El desarrollo de procesos tecnológicos para elaborar biocarbón, factibles de ser implementados en México, constituye un desafío para los tecnólogos locales. Adicionalmente, constituye una potencial fuente de trabajo, no convencional, para productores del sector agroforestal y entidades municipales, al generar ingresos extras dando valor agregado a los residuos orgánicos y al generar un producto con valor comercial. Poco se sabe del efecto que tiene en las plantas el tipo de materia prima empleada para la generación del biocarbón o, de la pirólisis que se usa para su producción; tampoco hay mucha información sobre la presencia de sustancias que pudiesen resultar tóxicas para los microorganismos edáficos o las plantas. Las respuestas a las interrogantes anteriores servirán para generar bases sólidas y proponer su uso como mejorador del suelo y como un mecanismo para el secuestro de carbono en el mismo.

Palabras clave*: pirólisis; secuestro de carbono; bioenergía.*

SUMMARY

There are recent technologies that can help counter soil degradation and sequester carbon. One is the application of biochar (biochar) to the soils. Biochar is a material produced by pyrolysis of waste biomass or organic waste from urban life. Mexico soils exhibit a strong physical, chemical and biological degradation, which has not been assessed in its proper dimension. Recent literature indicates positive experiences resulting from the application of biochar to the soil, generating an improvement of the physical, chemical and biological properties, which result in increased crop productivity. The biochar, a recalcitrant form of carbon incorporated into the soil, acts as a reservoir of long life of carbon, delaying its return to the atmosphere as CO_2, a situation that would help to mitigate climate change. An additional benefit of this product is that the raw material for its production comes from a renewable source and municipal organic waste, which often constitute environmental pollution problems. The generation and soil application is a relatively recent technology or alternative, which has been little or not used in Mexico. Therefore, it is advisable to know more about it and its benefits. Little is known about the effect of the type of raw material used for the generation of biochar, the effect of the pyrolysis

Como citar este artículo:
Escalante Rebolledo, A., G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco y J. D. Etchevers Barra. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. Terra Latinoamericana 34: 367-382.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: junio de 2016:
Publicado en Terra Latinoamericana 34: 367-382.

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

is used for production or the effect it has on plants, as well as the presence of substances that could be toxic to soil microorganisms or plants. To avoid unnecessary risks or adverse effects on its use, it is necessary to characterize the chemical and physical properties of different types of biochar and elucidating the effect of its application on soil properties and crops. The answers to the above questions and the effect of the application of biochar to soils of Mexico will serve to generate solid foundation and propose their use as practice for improvement and as a mechanism for carbon sequestration in the soil. The development of technological processes for making biochar, feasible to be implemented in Mexico, is a challenge for local technologists and a potential source of non-standard work, apart from the possibility of generating additional income to producers of agricultural and forestry sector and municipal entities that could transform organic waste into a product with commercial value. This paper is a review of the literature and some personal experiences of the authors.

Index words: *pyrolysis; soil carbon sequestration; biofuels.*

INTRODUCCIÓN

La pérdida de la fertilidad y la degradación del suelo en México es un fenómeno agravado por el cambio climático que perturba la producción de alimentos y afecta la disponibilidad de agua (deficiencia o exceso) causada por sequías extremas o lluvias torrenciales, o por temperaturas muy altas o muy bajas. La gestión sustentable de éste y de los cultivos que en él se siembran contribuiría a la recuperación de la fertilidad perdida (Funes y Monzote, 2001; Sánchez *et al*., 2011) en este componente fundamental del agroecosistema. El empleo de biocarbón puede ser una posibilidad para contribuir a paliar la pérdida de fertilidad y la declinación de las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos de México (Semarnat-Colpos, 2003) y particularmente la disminución de la materia orgánica, el incremento de la erosión y la degradación física.

La aparición de deficiencias nutrimentales generadas entre otros, por la pérdida de la fertilidad del suelo y en especial de la materia orgánica, reduce los rendimientos que pueden alcanzar los agrosistemas. Este es el caso del nitrógeno, un elemento generalmente escaso en el suelo. Este problema es frecuentemente subsanado con aplicaciones de fertilizantes inorgánicos. En ciertas zonas del país éstos se usan indiscriminadamente (hiperfertilización) lo que ha llegado a provocar contaminación de los cuerpos de agua y degradación en el suelo. Otros pocos agricultores usan abonos orgánicos (Fortis *et al*., 2007). Existen reportes que indican que el biocarbón puede retener temporalmente nitrógeno soluble en su estructura y liberarlo más lentamente que los productos inorgánicos, incrementando así la eficiencia de este elemento y la productividad de los cultivos (Zheng *et al.*, 2013). También se ha considerado que el empleo de nuevas tecnologías como el uso de biofertilizantes, microorganismos y fertilizantes minerales para mejorar una deficiente fertilidad del suelo, podría verse apoyada por el empleo del biocarbón (Yamoah *et al*., 2002). El biocarbón provoca cambios positivos en el suelo que favorecen sus propiedades y el crecimiento de los cultivos (Ippolito *et al*., 2011). También contribuye a reducir el impacto del cambio climático, por estar constituido principalmente por formas resistentes a la oxidación, con lo que el carbono puede permanecer por largo tiempo en el suelo sin regresar a la atmósfera.

El biocarbón es un producto factible de ser obtenido sólo donde hay suficiente biomasa disponible, tal es el caso de los subproductos de actividades agroforestales o residuos orgánicos urbanos, que pueden ser usados como materia prima. Aunque la producción de biocarbón y su aplicación al suelo son nuevas tecnologías empleadas en varias partes del mundo (Lehman y Joseph, 2009; Major, 2010; Steiner, 2010; van Zwieten *et al*., 2010), en México, hay poca información disponible acerca de este producto. Si atendemos a las ventajas descritas en la literatura (Downie *et al.*, 2009; Lehmann y Joseph, 2009; Amonette, 2009) y, en particular, a que su elaboración puede realizarse con materiales derivados de recursos renovables e *in situ*, es preciso hacer un análisis preliminar que avale futuras decisiones con respecto a su posible uso.

Los usos del biocarbón son múltiples (Schmidt y Wilson, 2014) y la aplicación de éste al suelo ya constituye una práctica común (Lehmann y Joseph, 2009; Verheijen *et al*., 2009). Varios investigadores (Chan *et al*., 2007; Lehmann y Joseph, 2009; Steiner, 2010) reportan que su empleo podría conducir a una mayor producción de los cultivos y mejoramiento de la calidad del suelo, de ahí el interés en esta práctica. Sin embargo, en otras partes del mundo ha sido cuestionado

su uso (Ernsting y Smolker, 2009) y hay reservas para su aplicación (Mills, 2012). Efectos negativos del uso de biocarbón en el rendimiento de los cultivos han sido reportados por Manya (2012). A largo plazo, es de interés conocer las consecuencias para la salud y la seguridad de los seres humanos, especialmente en relación con los contaminantes potenciales como los HAP´S (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), los metales pesados, los compuestos clorinados, etc. que podrían estar presentes en algunos tipos de biocarbones. Es por ello que antes de recomendar la aplicación del biocarbón al suelo, es necesario someter a prueba su tecnología de producción y uso.

El objetivo de este trabajo fue compilar información relevante acerca del biocarbón generada en diversas partes del mundo, como base para iniciar en México estudios a nivel de laboratorio, invernadero y campo, que permitan verificar su eficacia como mejorador de suelos y como medio para secuestrar carbono. Dado que en muchas ocasiones se confunde el término biocarbón (biochar) con el de carbón se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica dirigida a cubrir las siguientes reflexiones ¿Qué es el biocarbón? ¿De dónde deriva su importancia? ¿Cómo se produce? ¿Cuáles son los beneficios al ser usado en el suelo? Los autores de esta revisión bibliográfica están conscientes que existe una enormidad de literatura sobre el tema, baste para ello la consulta del tema en la Web o red informática sin embargo se trató de seleccionar prioritariamente los documentos originales que dieron origen a esta nueva tecnología, el célebre libro de Lehmann y Joseph (2009) "*Biochar: Environmental Management*" y artículos del mismo autor. También se seleccionaron artículos científicos disponibles en las bases de datos referenciales de SCOPUS, porque son documentos que pueden ser consultados más fácilmente dada su disponibilidad. Se sabe de otro tipo de literatura sobre el tema, sin embargo, su disponibilidad es limitada para la mayor parte de los usuarios que pueden estar interesados en esta tecnología en el país.

Es importante señalar que en esta revisión no se trata de abarcar toda la gama de componentes que definen el proceso de la pirólisis, ni tampoco se aborda este proceso como alternativa a la producción de energía renovable, para lo cual probablemente ha sido desarrollado prioritariamente este proceso. Se quiso abordar el tema de la pirólisis ya que es una parte indispensable dentro del proceso de generación del biocarbón, para que los interesados en la tecnología tengan una idea general de la necesidad de definir condiciones y características del mismo. El proceso de pirólisis es complejo en tanto que para ello intervienen elementos a definir con precisión tales como materia prima y sus características (tamaño, porcentaje de humedad, etc.), condiciones de pirólisis (temperaturas, velocidad de la reacción, tasas de calentamiento, tiempos de residencia etc.) y otros aspectos que requieren una mayor extensión en el tema. Es por ello que en este trabajo no se comparan los distintos procesos que existen o usan para tal propósito, ni se evalúan las energías asociadas a cada proceso. Esto es motivo de otras contribuciones que están siendo generadas por los autores.

La mayoría de los trabajos desarrollados sobre biocarbón (*biochar*) en el mundo presentan los beneficios del uso del mismo dentro de una visión de manejo agronómico enfocado a la productividad de los agosistemas. También se ha dado mucho énfasis en los últimos años a los aspectos microbiológicos asociados a las funciones de éste en el suelo. Sin embargo, en esta revisión los autores hemos querido centrar el interés en el uso del biocarbón como mejorador de suelo, una visión raramente abordada por los expertos del tema. De ahí que uno de los ejes del trabajo hace referencia a la situación de degradación y disminución de la fertilidad del suelo asociada a la pérdida de la materia orgánica, problemática presente en los suelos de México. Es por ello que se dio mayor importancia a la información sobre las propiedades físicas y químicas del biocarbón y a aquellas relacionadas con su estructura, en tanto que son éstas las que se asocian más con la problemática de la degradación del suelo. El biocarbón se propone como mejorador de las propiedades físicas (porosidad, infiltración de agua, estructura, entre otros), también como material de encalado ya que muchos biocarbones tienen valores de pH altos. Tiene potencial en la captura de carbono en el suelo, sobre todo de suelos degradados que han perdido la materia orgánica que es básica en la fertilidad física del suelo.

Naturaleza: ¿Qué es el Biocarbón?

El biocarbón es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno (pirólisis), a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 700 ºC) y que es destinado a uso agrícola, lo que hace que sea diferente al carbón usado como combustible y al carbón activado. La International Biochar Initiative o

IBI (2012) en su "Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil", define al biocarbón como "un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno".

Estructura Química

Algunos autores consideran que la composición química de los biocarbones es muy similar al carbón producido para combustible y que lo único que los distingue es el objetivo para el cual fueron preparados (Schahczenski, 2010). Sin embargo, el biocarbón presenta relaciones O/C más altas que el carbón mineral, que también tiene su origen en la biomasa, pero que se forma por procesos geológicos en tiempos que comprenden escalas geológicas (Major, 2011).

Numerosos estudios (Lehmann y Joseph, 2009; Woolf *et al*., 2010; Shrestha *et al*., 2010; Major, 2010) sugieren que los componentes del biocarbón son altamente recalcitrantes en los suelos; esto es, que resisten la oxidación química y biológica, por lo que su tiempo de residencia es de cientos a miles de años, al menos de 10 a 10 mil veces más grande que los tiempos de residencia de la mayoría de la materia orgánica del suelo. Por esta característica de recalcitrancia, la adición de este producto al suelo puede actuar como un sumidero potencial de carbono (Verheijen *et al*., 2009) y así contribuir a la mitigación del exceso de CO_2 en la atmósfera. Sin embargo, es importante mencionar que no todo el biocarbón permanece inalterado en el suelo, sino que una parte de éste puede ser oxidada (Cheng *et al*., 2008) lo que modifica algunas cualidades del suelo.

El proceso de pirólisis involucra una red compleja de reacciones asociadas a la descomposición de los principales constituyentes de la biomasa, como son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, que se caracterizan por su reactividad diferente. La celulosa es uno de los componentes importantes de los residuos agrícolas, por ello resulta interesante observar cuál es su cambio durante la pirólisis. Su degradación térmica entre 250 y 350 °C da lugar a muchos compuestos volátiles (vapores de agua y alquitrán, hidrocarburos, ácidos, H_2, CH_4, CO y CO_2) quedando una matriz de carbono amorfa y rígida (Novak *et al*., 2009). Al aumentar la temperatura, se incrementa la proporción relativa de carbono aromático por la pérdida de compuestos volátiles y se lleva a cabo la conversión de carbonos, de oxialquilos a arilos y oxiarilos cuyas estructuras son semejantes a la del furano (Baldock y Smernik, 2002). A 330 °C las láminas de grafeno poliaromático empiezan a crecer lateralmente, a expensas de la fase de carbono amorfo y eventualmente coalescen. A 600 °C, el proceso dominante es la carbonización, lo que provoca la remoción de la mayoría de átomos no carbonosos como Ca, Mg, K, que se mantienen en la materia original por lo que aumenta aún más la proporción relativa de carbono, que puede ser mayor del 90% en peso en los biocarbones de materias primas de madera (Antal y Grønli, 2003). Novak *et al*. (2010) investigaron la química superficial de un biocarbón derivado de cáscara de nuez y revelaron que los principales grupos funcionales existentes eran hidroxil fenólico, C = O aromático, grupos alifáticos, entre otros. La caracterización de un biocarbón no fresco reveló que contiene una gran fracción de benceno y cantidades significativas de otros compuestos aromáticos como tolueno, benzonitrilo e hidrocarburos aromáticos policíclicos, además de éteres y ésteres metílicos aromáticos dentro de su estructura (Kaal *et al*., 2008).

En resumen, es comúnmente aceptado que cada partícula de biocarbón consiste de dos fracciones estructurales principales: láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas, ambas asociadas con enlaces de carbono en forma de anillos de tipo benceno con oxígeno o hidrógeno (Lehmann y Joseph, 2009). Estos enlaces entre estructuras aromáticas de C-O y C-H gobiernan la estabilidad del biocarbón y son usados para medir su grado de aromaticidad (Hammes *et al*., 2006). También tiene estructuras de carbono oxidadas y alifáticas muy fácilmente degradables.

Características Físicas-Químicas

Con respecto a sus propiedades físicas, el biocarbón es un sólido carbonoso, de color negro, con una superficie intrincada y desordenada, cuyas características estructurales varían por el tipo y tiempo de la pirólisis. En general es amorfo según estudios de microscopía electrónica de barrido realizados por Qiu *et al*. (2008). El biocarbón está constituido por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la fuente y tamaño de la materia prima (Lehmann, 2007). Posee una alta porosidad con micro, meso y macroporos, cuyos tamaños van de <2 nm, 2-50 nm y

>50 nm, respectivamente por lo cual lo han comparado con un "arrecife subterráneo" que puede ser hábitat para microorganismos (Rouquerol *et al*., 1999; Downie *et al*., 2009). Los macroporos provienen de los espacios propios de la materia prima original y permiten el transporte rápido de sorbatos, para su posterior difusión en el volumen de microporos, ayudando al transporte de moléculas concentradas (Martínez *et al*., 2006). Los microporos son generados en el proceso de pirólisis, por lo que al aumentar la temperatura aumenta la microporosidad, además generan más área de carga reactiva. Los microporos están asociados a la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y de gases (Verheijen *et al*., 2009). Presenta muy baja densidad aparente, entre 0.30 a 0.43 g cm^{-3} como es el caso de biocarbones de diferentes tipos de madera producidos en diferentes tipos de hornos (Pastor *et al*., 1993). En general presenta una alta área superficial, entre 200 y 400 m^2 g^{-1} (Kishimoto y Sugiura, 1985), aunque también se han encontrado valores tan bajos como 3.64 y 14.14 m^2 g^{-1} para biocarbones producidos de pasta de semilla de cártamo prensado, bajo una atmósfera estática de nitrógeno (Angin y Sensoz, 2011). En otro estudio, dos biocarbones derivados de residuos de fábrica de papel generados bajo una pirólisis lenta, presentaron valores de 2.9 a 114.9 m^2 g^{-1} (van Swieten *et al*., 2010a). Ocasionalmente, han excedido los 1000 m^2 g^{-1}, lo cual es importante por el efecto que ello tiene sobre la capacidad de retener nutrimentos y agua (Downie *et al*., 2009). Sin embargo, debe considerarse que el biocarbón experimenta cambios químicos y estructurales durante los procesos de "envejecimiento", es decir, con el tiempo (Cheng y Lehmann, 2009) lo que modifica sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Un esquema de caracterización general del biocarbón considera la determinación de: humedad, ceniza (sílice, hierro, alúmina y materia no combustible), materia volátil o móvil y materia residente o recalcitrante (carbono fijado) que corresponde al sólido que queda después de que la materia volátil ha sido expulsada, pero no es carbono en su totalidad (McLaughin *et al*., 2009).

La materia volátil o móvil, es la fase gaseosa que se produce cuando el biocarbón es calentado. La proporción de ésta es transcendental cuando se aplica biocarbón al suelo, ya que existe evidencia que precipita dentro del mismo. Al suelo le provee una fuente de carbono soluble que puede causar una deficiencia de nutrimentos a corto plazo, porque estimula el crecimiento de microorganismos que compiten con la planta por nitrógeno disponible y, además, desaparece generalmente en una estación de crecimiento, sin contribuir a mejorar las propiedades del suelo a largo plazo (McLaughlin *et al*., 2009). El contenido de materia volátil ha sido usado como una medida de la susceptibilidad del biocarbón a degradarse. También se sabe que a mayor contenido de material volátil es mayor la repelencia del biocarbón al agua.

El biocarbón puede presentar valores elevados de la relación C:N. Se han reportado valores de esta relación de 245 en un biocarbón de cáscara de nuez. Novak *et al*. (2010) concluyeron que el 58% de carbono se encuentra formando parte de estructuras aromáticas altamente condensadas, y una menor cantidad se presenta en forma alifática (29%) y carboxílica (13%), por lo que es poco probable que altere la biodisponibilidad de carbono en el suelo. Los materiales ricos en nitrógeno con una baja relación C:N son buenos para producir composta, y favorecen la liberación de nitrógeno para las plantas y microorganismos. Sin embargo, cuando esa relación es alta, como en los materiales leñosos, la liberación de nitrógeno es disminuida o nulificada. Debido a su recalcitrancia, el uso del biocarbón como mejorador de suelos no conlleva un aumento de carbono lábil, por lo tanto, la relación C:N efectiva no aumenta, por lo que no se tiene un efecto adverso en la asimilación de nitrógeno por las plantas (Kimetu *et al*., 2008). En estudios recientes en los cuales se adicionó abonos ricos en nitrógeno al biocarbón, se observó una reducción de la pérdida de este elemento arriba del 50% por volatilización en forma de amoniaco (Steiner *et al*., 2010).

La composición química de los biocarbones es muy variable. Por ejemplo, un biocarbón producido a partir de roble blanco y rojo presentó 90.8% de carbono, 7.2% de oxígeno y 1.7% de hidrógeno (Cheng *et al*., 2008). Mientras que un biocarbón de arroz y otro de trigo presentaron 80.7 y 80.4% de carbono, 9.11 y 9.03% de oxígeno y 2.79 y 2.75% de hidrógeno, respectivamente, lo que pone de manifiesto su amplia variabilidad (Qiu *et al*., 2008). El nitrógeno de la biomasa original puede no estar realmente disponible. El fósforo generalmente es conservado durante la volatilización de moléculas orgánicas asociadas y está presente como cenizas dentro del biocarbon, y al solubilizarse queda disponible para las plantas (Mašek y Brownsort, 2011).

Estudios de caracterización de biocarbones han consignado reacciones donde el pH varía de ácido a alcalino, con una media de pH 8.1 y un intervalo de pH entre 6.2 y 13 (Chang y Xu, 2009; Srinivasarao *et al.*, 2013). En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ésta es muy variable y va desde unas cuantas unidades hasta 40 cmol kg^{-1} producto de su química superficial. Ésta cambia después de su incorporación a los suelos por las interacciones con el ambiente. Se ha demostrado que la CIC puede ser muy baja cuando se usan bajas temperaturas en la pirólisis, pero se incrementa significativamente a temperaturas más altas (Lehmann, 2007). También se ha reportado que el biocarbón presenta una mayor capacidad de intercambio de cationes (CIC) por unidad de carbono que la materia orgánica del suelo (Sombroek *et al*., 1993), debido a su mayor área y carga negativa superficial, y a una mayor densidad de carga (CIC potencial por unidad de área). Los responsables del incremento de la CIC y la reactividad del biocarbón en el suelo son los grupos carboxílicos que se forman sobre los puentes de núcleos aromáticos del biocarbón que resultan de su oxidación (Liang *et al*., 2006). En comparación con otros tipos de materia orgánica, el biocarbón es capaz de adsorber fuertemente aniones fosfato, aunque el mecanismo aún no se conoce (Lehmann, 2007). Esto es debido a que las cargas superficiales del biocarbón pueden ser positivas, principalmente en los biocarbones recién preparados. A medida que avanza el envejecimiento del biocarbón se generan más cargas negativas que positivas y se incrementa la acidez superficial con el consecuente decrecimiento de la basicidad (Cheng y Lehmann, 2009). Los cambios en las cargas superficiales del biocarbón están correlacionados muy fuertemente con el tiempo y las temperaturas anuales medias. Los biocarbones maduros presentan mayor CIC que los jóvenes, por su contacto con el oxígeno y el agua (Cheng *et al*., 2008). La CIC se reduce conforme a la disminución del pH del biocarbón, así valores de CIC son bajos a pH bajo y se incrementa a pH alcalinos. Es posible que pueda presentarse un punto en el que la CIC tenga el valor de cero (punto de carga neta cero, de manera similar al término usado en los suelos) el cual depende de la temperatura de pirólisis. La CIC potencial (a pH 7) y el área superficial de un biocarbón recién producido parecen incrementarse con la temperatura de la pirólisis. Lehmann (2007) considera que entre 450 y 550 ºC podría ser la temperatura óptima para la elaboración del biocarbón.

HISTORIA DEL BIOCARBÓN

Este producto tuvo su origen al ser redescubiertas las tierras negras de los indios amazónicos de Brasil, descritas como Terra Preta (tierra negra), por Smith en 1879 y Hartt en 1885 (Woods, 2004). Estos autores consignaron la existencia de unos suelos oscuros y fértiles en la Amazonia brasileña, pero no pudieron precisar su origen. Falcao (2012) consideró que dichos suelos fueron desarrollados por los indios mediante depósito de materiales orgánicos, derivados de la quema de biomasa y restos de esqueletos de pescado, lo cual los transformaba en suelos fértiles al agregársele cierta riqueza de nutrientes. Las altas concentraciones de carbón pirogénico en la Terra Preta provinieron principalmente del carbón de cocina y restos de incendios y productos no combustibles (Glaser *et al*., 2001). Un contenido anormalmente alto de nutrimentos esenciales como P, Ca y K en muchos de estos suelos, apoyan tales pronunciamientos. Las teorías acerca del origen antropógeno de las tierras negras también incluyen quema de los sitios, ya sea por incendios casuales en el área o intencionales, realizados para destruir bosques con el fin de usarlos como tierras de cultivo y para eliminar la maleza (Woods y Glaser, 2004). Sin embargo, hoy es ampliamente aceptado que las Terras Pretas fueron no solamente usadas por los pobladores locales recientes, sino que también son un producto de la gestión indígena del suelo como lo propuso Gorou (1950). Estudios posteriores (Sombroek, 1966; Smith, 1980; Kern y Kämpf, 1989) confirmaron estas propuestas.

Se considera que los inicios de la formación de Terra Preta de Indio corresponden aproximadamente a los últimos tiempos del período pre-colombino en la Amazonia (Neves *et al*., 2003). Orlando (2012) comentó que antes se pensaba que sólo se encontraban en la Amazonia, pero aseguró que recientemente este tipo de suelos también pueden encontrase en México y África. Asimismo se tienen evidencias de su existencia en Borneo (Sheil *et al*., 2012) y, en Estados Unidos de América, desde hace más de 10 mil años. En esos casos habrían sido generados por incendios, tanto naturales como inducidos, en las praderas (Skjemstad *et al*., 2002; Laird *et al*., 2009). En Australia, Alemania (Skjemstad *et al*., 2002) y en Japón (Ishii y Kadoya, 1994) se han encontraron suelos similares.

El estudio de esos suelos con alto contenido de carbón llevó a concluir que presentaban excelentes

propiedades, entre las que podemos mencionar su elevado contenido de materia orgánica y carbono residente, una elevada disponibilidad nutrimental y altos contenidos de humedad, mayor capacidad de intercambio catiónico y mayor actividad microbiológica (Lehmann y Joseph, 2009).

En el trabajo publicado por Neves *et al*. (2003) se citan a muchos investigadores (Retan, 1915; Morley, 1927; Tyron, 1948; Santiago y Santiago, 1989), que estudiaron el uso de carbón en la gestión del suelo. En el mismo trabajo se indica que, incluso Liebig (1878) describió una práctica en China en la cual la biomasa de desecho era mezclada con suelo e incendiada durante varios días hasta obtener una tierra negra, la cual proveía de vigor a las plantas. Pero no fue sino hasta 1966 que el científico holandés Wim Sombroek (1966) en su publicación "Suelos de la Amazonia" prestó atención a estos suelos y tiempo después promovió la idea de desarrollar nuevas tierras negras como almacenes de carbono para cultivos intensivos que él llamó Tierra Negra Nueva (Woods y McCann, 1999; Neves *et al*., 2003). De aquí nació la idea de usar una tecnología semejante para que el carbón de la quema de desechos vegetales fuese enterrado en el suelo, como una forma de capturar de manera relativamente permanente (secuestrar) el exceso de carbono atmosférico y contribuir a paliar el efecto del cambio climático. El intento de imitar o recrear este tipo de suelos con altos contenidos de carbón y tan buenas características y alta productividad, originó el interés particular en el estudio del biocarbón.

PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL BIOCARBÓN

Materias Primas

Los materiales usados para elaborar biocarbón son muy numerosos. Sin embargo, no todos los residuos o subproductos son materias primas apropiadas para producirlo. Una de las características que deben ser prioritarias para su selección es que los materiales no deben competir con otros usos, principalmente si éstos generan productos de mayor valor económico que el biocarbón, o bien que compitan con la producción de alimentos y de bienes y servicios ambientales. Entre los materiales más citados en la literatura se tienen a los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel, de arroz; los residuos de aceituna, desperdicios orgánicos de la vida urbana. Lehmann y Joseph (2009) mencionan entre dichas materias primas a: madera, estiércol, hojas, residuos de cultivos y Brick (2010) agregó a éstas, camas de aves, algas, cáscaras de naranja, de nueces y lodos residuales. La transformación de estos últimos a biocarbón al menos asegura, la exclusión de gérmenes que pudiesen resultar nocivos para los cultivos de consumo humano o animal. Esta transformación representa una alternativa al depósito de lodos residuales que se incrementará en el futuro cercano, en la medida en que en el país se construyan más plantas de tratamiento de aguas grises. La materia prima usada para elaborar los biocarbones y las reacciones químicas que ocurren en el proceso de pirólisis definen las características estructurales y químicas específicas para los biocarbones dando origen a materiales muy heterogéneos (Antal y Grønli, 2003; Brick, 2010). Esto se debe a que los componentes orgánicos que conforman la biomasa original influyen directamente en las propiedades químicas y físicas del biocarbón formado, lo que define a su vez los efectos benéficos del biocarbón y su tiempo de residencia en el suelo (Schmidt y Noack, 2000; Lehmann, 2007). En México se han elaborado biocarbones a partir de aserrín, bagazo de caña de azúcar, residuos de encino y pino, lirio acuático y cascarilla de café, con objeto de dar valor agregado a estos residuos que tradicionalmente son poco valorados en el medio y también porque se trata de evitar que generen problemas de salud y contaminación de ecosistemas. Por ejemplo, en México el aserrín es uno de los residuos más generado en los aserraderos, se genera aproximadamente 7.95% de aserrín por cada 35.75% de residuos como tiras, recortes, etc. (Cruz, 2012[1]). El aserrín se ha asociado a afecciones respiratorias como asma, bronquitis crónica y otras como alergias y dermatitis. Otro residuo muy abundante en el campo mexicano es generado en la industria de la caña de azúcar. Los residuos que quedan en el campo cañero mexicano varían de 16 a 30 toneladas por hectárea (Toledo *et al*., 2008), el bagazo que queda por cada tonelada procesada de tallo es de 250 a 400 kg (Hernández *et al*., 2008). La práctica más común dada a estos residuos ha sido la quema, actividad que ha sido considerada como inapropiada en el marco de la sustentabilidad y la ecología pero que es muy practicada. Aunque el bagazo de caña tiene otros usos como materia prima para la producción de energía

[1] Cruz, C. C. 2012. Residuos generados del aprovechamiento maderable en el estado de Durango. Tesis Ingeniero forestal industrial. Chapingo, Texcoco, Estado de México.

en las calderas de los ingenios o centrales azucareras, o para la extracción de subproductos como alcohol, se ha considerado como materia prima para la producción de biocarbón en planes del gobierno mexicano.

Procesos para Obtener Biocarbón

Éstos son diversos, principalmente se consideran las tecnologías termoquímicas para transformar la biomasa en fuentes de energía renovable. Éstas pueden ser clasificadas en cuatro categorías generales: pirólisis lenta, pirólisis rápida, pirólisis ultrarápida y gasificación (Laird *et al*., 2009; Brick 2010; Ippolito *et al*., 2011). La pirólisis ocurre en ausencia completa de oxígeno mientras que la gasificación se da con reducida cantidad de él, Brick (2010) propone un quinto proceso que es la carbonización hidrotérmica.

La pirólisis, es el proceso termoquímico usado para transformar biomasa y otros materiales orgánicos de baja densidad energética (~1.5 GJ m^{-3}) a: líquidos de alta densidad energética, conocidos como bio-aceites (~22 GJ m^{-3} o ~17 MJ kg^{-1}), a sólidos de alta densidad energética conocidos como biocarbón (~18 GJ kg^{-1}) y a un gas de relativamente baja densidad energética, conocido como gas de síntesis (syngas) (~6 MJ kg^{-1}) (Laird *et al*., 2009). Fundamentalmente la pirólisis involucra el calentamiento de materiales orgánicos a temperaturas superiores a 400 °C en ausencia de oxígeno. A estas temperaturas, los materiales se descomponen térmicamente, liberando una fase de vapor y generando una fase sólida residual (biocarbón). Si los vapores de la pirólisis son enfriados ocurre una condensación en compuestos líquidos polares y de alto peso molecular (bio-aceite), mientras que los compuestos volátiles de bajo peso molecular permanecen en la fase gaseosa (gas de síntesis o syngas). Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la pirólisis son muy complejas y dependen tanto de la naturaleza de la biomasa como de las condiciones del reactor. Cuando se usa una tecnología de alta eficiencia es posible alcanzar rendimientos de masa alrededor del 30-40% (base húmeda), con producciones de energía de cerca del 30% (contenida en el carbón) y contenidos de carbono fijado arriba del 90% de la biomasa original (McHenry, 2009). Las condiciones de pirólisis y las características de la materia prima (composición, distribución de tamaño de partícula y de tamaño de poro, entre otras), determinan en gran medida las propiedades físicas y químicas del carbón producido lo que apoya la conveniencia de hacer su aplicación en un suelo, registrar su comportamiento, transporte y destino en el ambiente (Verheijen *et al*., 2009).

Pirólisis lenta. La pirólisis convencional o lenta se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa pausados, temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de los sólidos y el gas. De acuerdo al sistema, los lapsos de calentamientos son cerca de 0.1 a 2 °C por segundo y prevalecen las temperaturas alrededor de los 500 °C. El tiempo de residencia del gas puede ser mayor de 5 s, mientras que para la biomasa puede ser de minutos a días (Sadaka, 2007). Según Gheorghe *et al*. (2009) este sería el proceso con el más alto rendimiento de biocarbón.

Pirólisis rápida**.** El calentamiento es mayor a 200 °C s^{-1} y las temperaturas que prevalecen son usualmente mayores a los 550 °C. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente son líquidos, como los bioaceites y gases ricos en etileno que podrían ser usados para producir alcoholes o gasolina. La producción de carbón y alquitrán es mucho menor en este proceso (Farag *et al*., 2002; Czernik y Bridgwater, 2004; Sadaka, 2007). El tratamiento provoca la ruptura de los polímeros de los componentes de la biomasa en vapores condensables que forman bioaceite. Además, potencialmente podría ser un método seguro de eliminación de materias primas contaminadas por toxinas (Mullen *et al*., 2010).

Pirólisis ultrarrápida. La pirólisis ultrarrápida se caracteriza porque las temperaturas a las que se lleva a cabo el proceso son moderadas (400-600 °C) y las tasas de calentamiento son rápidas (>2 °C s^{-1}). Los tiempos de residencia del vapor son usualmente menores a 2 s. En este sistema se produce considerablemente menos alquitrán y gas. Sin embargo, los productos aceitosos obtienen su máximo rendimiento (75 y 80%) (Sadaka, 2007; Demirbas, 2009).

Gasificación. En este proceso la biomasa, especialmente madera, se quema en una secuencia de dos reacciones. La primera es la conversión de madera a carbón y se le llama carbonización con gasificación de la madera. Esto, básicamente, es la misma conversión que ocurre en la pirólisis lenta. Después que el carbón se ha formado, la segunda reacción, con mayor temperatura, convierte el carbón a ceniza y es llamada gasificación de carbón. Si hay demasiado oxígeno entonces todo el carbón es consumido y sólo quedan cenizas. Si la cantidad de oxígeno es limitada, entonces sólo una parte del carbón es consumido y algunos remanentes

salen por el fondo del gasificador (McLaughin *et al*., 2009).

Carbonización hidrotérmica. Otra tecnología para producir biocarbón es la carbonización hidrotérmica, que consiste en aplicar calentamiento a materiales con gran contenido de agua, como lodos residuales, pulpa de café, estiércoles, algas, entre otros, que son sumergidos en agua, y aunque la temperatura es alta, no se llega a la ebullición (Brick, 2010). Mediante este proceso ha sido posible carbonizar materiales sólidos con lignina y celulosa, y polisacáridos disueltos en agua, con la obtención de productos carbonosos nanoestructurados (Baccile *et al*., 2010). Asimismo, se pueden producir biocarbones a temperaturas bajas (~200 °C) y tiempos muy cortos (Titirici *et al*., 2007). Además, como no es necesario secar los materiales para hacer el biocarbón, hay un gran ahorro de energía y por tanto los costos de producción disminuyen. Sin embargo, no ha tenido gran desarrollo y sólo existen algunas plantas piloto.

La pirólisis rápida produce cerca del 12% de biocarbón, la moderada el 20%, la lenta el 35%, la gasificación del 10 al 20% y la combustión hidrotérmica del 37 al 70% (Brick, 2010). Verheijen *et al*. (2009) consideran que el proceso más adecuado para producir biocarbón como mejorador de suelos y a fin de ayudar a mitigar el cambio climático es la pirólisis lenta, ya que maximiza la producción de biocarbón que es el compuesto más estable de los productos finales de la pirólisis. Las temperaturas de 300 a 500 °C optimizan el rendimiento de biocarbón (Hayes, 2009).

Variables que Afectan la Pirólisis

Diversas variables afectan el mecanismo y la cinética de las reacciones de pirólisis. Estas variables, incluyen la composición del sustrato, el intervalo de calentamiento, la temperatura y presión de la cama, atmósfera ambiental presente y uso de catalizadores, por lo que deben ser completamente comprendidas y apreciadas. Entre otras cosas, estas variables tienen un efecto profundo en la secuencia y cinética de las reacciones y por tanto, en el rendimiento de los productos formados. Al entender la influencia de estas variables en el proceso, las condiciones de pirólisis pueden ser anticipadas y controladas para reducir las reacciones secundarias no deseadas y promover la formación de productos deseables, ya que las cantidades de fracciones sólida, líquida y gaseosa dependen marcadamente de tales variables (Sadaka, 2007).

Composición del sustrato. La biomasa que se puede emplear para producir biocarbón está formada de materiales complejos y heterogéneos derivados de diferentes orígenes. Su estructura y composición varía de acuerdo a las especies de las cuales proviene y dichos componentes son responsables de la variedad y complejidad de los productos formados durante la pirólisis. Krull *et al*. (2010), encontraron que la mayoría de las propiedades agronómicas del biocarbón variaban de acuerdo a la materia prima. La heterogeneidad de la biomasa resulta ser un obstáculo para su uso químico, esto debido a que se obtiene un rendimiento más bajo al considerarse los productos individuales derivados de cada uno de sus elementos. Esto también afecta el rendimiento del biocarbón y de combustibles que pueden ser productos de la pirólisis (Sadaka, 2007). Además, es necesario considerar que en la actualidad, para producir biocarbón, no sólo se usan los materiales que originalmente contribuyeron a la formación de la Terra Preta, que eran principalmente restos de árboles, malezas, huesos, sino que también se utilizan restos de plantas cultivadas cuyo manejo agronómico ha aportado agroquímicos, como es el caso de los lodos residuales o camas avícolas que probablemente contienen concentraciones importantes de herbicidas, pesticidas, fungicidas, metales pesados y antibióticos, que pueden afectar al suelo, a los cultivos y, finalmente, a la salud humana (Verheijen *et al*., 2009).

Intervalo de calentamiento. Este parámetro representa el aumento de temperatura por segundo, que aunado a la duración del calentamiento y a su intensidad, afectan la velocidad, grado, secuencia de las reacciones de pirólisis, y la composición de los productos resultantes. Las reacciones ocurren en una amplia gama de temperaturas; por lo tanto, los productos formados al principio tienden a experimentar una transformación adicional y su descomposición en una serie de reacciones consecutivas. Al ser más bajo el intervalo de temperatura se aumenta la producción de biocarbón y al ser mayor, disminuye (Antal y Grønli, 2003; Sadaka, 2007). Este parámetro es importante porque modifica su posible valor para la agricultura, aún cuando no existe un consenso sobre cuál sería la mejor materia prima en términos de su uso en el suelo y de la producción de energía (Sohi *et al*., 2010).

El nivel de calentamiento es función de las dimensiones de la materia prima y el tipo de equipo de pirólisis empleado. La velocidad de difusión térmica dentro de una partícula disminuye con el incremento de su

tamaño, lo que resulta en un intervalo de calentamiento más bajo. Los productos líquidos son favorecidos por la pirólisis de partículas pequeñas y temperatura elevada, mientras que el rendimiento de productos volátiles (gases y líquidos) se incrementa con el aumento de la temperatura de calentamiento y en ese caso los residuos sólidos disminuyen (Sohi *et al*., 2010). El carbón es maximizado por la pirólisis de partículas grandes con bajas tasas de calentamiento y baja temperatura (Sadaka, 2007).

Temperatura. El tiempo requerido para obtener un cierto nivel de conversión disminuye con el incremento de temperatura. A baja temperatura, el carbón es el producto dominante seguido por el agua. Las maderas duras producen menos carbón, pero más ácidos que las maderas blandas (Sohi *et al*., 2010).

EFECTOS DEL USO DE BIOCARBÓN EN EL SUELO

Propiedades del Suelo

La incorporación de biocarbón al suelo puede alterar sus propiedades físicas tales como la textura, la estructura, la distribución del tamaño de poro, el área superficial total, y la densidad aparente, con repercusión en la aireación, capacidad de retención de humedad, crecimiento de las plantas y facilidad de laboreo del suelo. En ocasiones las partículas de biocarbón que son muy pequeñas pueden bloquear parcial o totalmente la porosidad del suelo con la consecuente alteración de su estructura y la disminución de infiltración de agua (Downie *et al*., 2009).

El biocarbón por lo general incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y, por lo tanto, la retención de NH_4^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, lo que probablemente se atribuye a su elevada superficie específica, alta carga superficial negativa y elevada densidad de carga, aspectos que no son frecuentemente desarrollados en los estudios sobre biochar.

Funciones y Procesos en el Suelo

Según varios autores, el biocarbón puede mejorar las funciones del suelo, así como intervenir en los procesos que en él se desarrollan (Verheijen *et al*., 2009). Algunas evidencias muestran que el biocarbón funciona como portador de microorganismos, por lo que su adición al suelo puede incrementar la población de hongos micorrízicos y los niveles de infección por *Rhizobium* siendo por ello incorporado a los trabajos de bioremediación de suelos (Amonnette, 2009). En plantas de tomate inoculadas con *Botrytis* se reporta que su aplicación indujo respuestas en las rutas de resistencia sistémica adquirida e inducida en el dosel, lo que sugiere que favoreció la resistencia al estrés biótico (Elad *et al*., 2011). Según Amonette (2009), la aplicación de biocarbón aumenta la capacidad de retención de nutrimentos en el suelo con la consecuente reducción de la necesidad de aplicar altas dosis de fertilizantes (Glaser, 2001) lo que se traduce en un aumento de la eficiencia de uso del fertilizante (Gaunt y Cowie, 2009; Laird *et al*., 2009).

Al aplicar biocarbón al suelo se puede aumentar su permeabilidad al agua y se reduce la escorrentía y los costos de riego (De Gryze *et al*., 2010). Esto se constató en suelos de Australia (Chan *et al*., 2007) y el Reino Unido (Gathorne *et al*., 2009) donde la aplicación de biocarbón mejoró la aireación del suelo e hizo más fácil el laboreo. Cuando se ha usado con fines de encalado, el biocarbón ha mejorado el balance del pH (Granatstein *et al*., 2009; Amonnette, 2009). Las mejoras del suelo atribuidas a la adición de biocarbón incluye también el incremento en la retención de humedad, y la permeabilidad del aire (McLaughlin, 2009).

Aún cuando la mayoría de estudios demuestran el efecto benéfico del biocarbón, algunos investigadores no han obtenido los mismos resultados. Por ejemplo, van Swieten *et al*. (2010), ensayaron el uso de dos biocarbones en un suelo australiano calcáreo, con una aplicación de 4.5 Mg $acre^{-1}$ (11.1 Mg ha^{-1}). Los resultados mostraron un incremento en el contenido de carbono total pero no en los nutrimentos extraíbles. Por su parte McClellan *et al*. (2007) probaron un biocarbón de cáscara de nuez macadamia de carbonizado ultrarrápido, en un estudio en macetas con suelos derivados de cenizas volcánicas, fértiles, cultivados, y usando lechuga como planta indicadora. Los mejores resultados en aumento de biomasa y consumo de nitrógeno correspondieron al testigo y a las macetas con biocarbón al 5%. En otro experimento en el que se probaron tratamientos con biocarbón, fertilización NPK y cal en un suelo infértil y usando maíz como cultivo indicador, el mejor tratamiento fue aquel sin biocarbón pero con fertilización NPK y cal. Por su parte Unger y Killorn (2011) evaluaron la aplicación de biocarbón y urea en un experimento de campo con maíz

durante tres años. Ellos constataron que el rendimiento de grano y biomasa no presentaron diferencias entre los tratamientos que usaron biocarbón, con y sin fertilizante, pero sí hubo una respuesta a la sola aplicación de fertilizante.

Se ha demostrado que el biocrabón puede retener elementos metálicos o contaminantes (Hiller *et al*., 2007). Por ejemplo, un biocarbón de estiércol probado por Brendová *et al*. (2012) puedo retener particularmente cadmio, otro de cascarilla de semilla de algodón retuvo además otros metales pesados, lo cual se atribuye a su alta área específica. Resultados similares se obtuvieron al usar biocarbón como adsorbente en un cultivo de arroz donde el suelo estaba contaminado con cadmio. Verheijen *et al*. (2009) reportan que el bicarbón también puede favorecer la sorción de compuestos orgánicos como herbicidas, pesticidas, enzimas; así como compuestos hidrofóbicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorinados en suelos y sedimentos, contribuyendo así a evitar efectos nocivos a corto y largo plazo (Verheijen *et al*., 2009).

Si se aplica biocarbón al suelo es indispensable considerar la Capacidad de Carga con Biocarbón (CCB) que es la cantidad máxima de carbono, en forma de biocarbón, que puede ser adicionada a los suelos de manera segura sin comprometer otras funciones de éste o del ambiente en general. Sin embargo, no es claro cómo se determina esta cantidad. Tampoco se sabe si la CCB varía en los biocarbones producidos por distintas materias primas y procesos, o si varía en diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales (Verheijen *et al*., 2009) lo cual debería ser motivo de mayor estudio. Se han reportado en la literatura cargas mayores a 140 Mg ha^{-1} (Lehmann *et al*., 2003). Otros trabajos reportan cargas superiores a 50 Mg ha^{-1} y 60 Mg ha^{-1}; sin embargo, en este caso, los efectos positivos en el rendimiento desaparecieron al aumentar la dosis, lo que llevó a atribuir la respuesta positiva al clima y el suelo (Rondon *et al*., 2007). También se han usado dosis menores, de 5 a 50 Mg ha^{-1} complementadas con una gestión correcta de fertilización, con lo cual se obtuvieron efectos positivos sobre el rendimiento de cultivos. Como la aplicación de biocarbón al suelo es una acción irreversible, se destaca que es muy complejo calcular la CCB adecuada para los cultivos, suelos y otras condiciones de manejo. Al respecto, es necesario considerar además de la productividad del cultivo otros aspectos como son la biología del suelo, el transporte de partículas finas del biocarbón a través del agua superficial y subterránea, entre otros. Por último, se debe tomar en cuenta el riesgo de una combustión espontánea del biocarbón en el suelo (Verheijen *et al*., 2009). De ahí la necesidad de recopilar resultados de experimentos en campo, los cuales son pocos y revisar con detalle la gran cantidad de experimentos en diferentes agroecosistemas.

Secuestro de Carbono y Cambio Climático

La agricultura y el cambio climático están fuertemente ligados, ya que la actividad agrícola contribuye a la formación de gases de efecto invernadero (GEI) en un alto porcentaje del total emitido (Sohi *et al*., 2009), sobre todo por el uso no racional de fertilizantes y las prácticas de cultivo (Martínez *et al*., 2008). En México, el sector agrícola representa el 6.4% del total de emisiones de GEI (INEGI, 2009). Asimismo, la actividad forestal también contribuye a éstos como resultado de la deforestación y los incendios provocados. La actividad pecuaria, en particular la de rumiantes, aporta, 14.5% del total de emisiones de GEI (Masera *et al*., 1997; FAO, 2013). Otro factor que contribuye a la generación de éstos gases es el cambio en el uso de la tierra (Akala y Lal, 2001). Ante este escenario, uno de los beneficios que se espera por el uso de biocarbón es la captura de carbono. En el ciclo del carbono las plantas toman CO_2 de la atmósfera para la fotosíntesis y al morir forman parte de la materia orgánica del suelo, presentando carbono en sus estructuras. Sin embargo, la mayor parte de esta materia es mineralizada por los microorganismos del suelo, en este proceso se libera CO_2 a la atmósfera, que se suma al producido por la respiración de las plantas. Las cantidades de CO_2 absorbidas y liberadas en este proceso están balanceadas, este es el caso de un balance de carbono neutral, es decir, que no incrementa la cantidad neta de este gas en la atmósfera. La adición neta de carbono a la atmósfera representa el carbono positivo, en tanto que la reducción neta de este gas refiere al carbono negativo. En este sentido, cuando se aplica biocarbón al suelo, dado que el carbono está en forma recalcitrante, tarda mucho tiempo en degradarse, convirtiéndose en carbono negativo (Schahczenski, 2010).

Lehmann y Joseph (2009) y Downie *et al*. (2009) consideran que la aplicación de biocarbón al suelo, debería considerarse como un mecanismo

de secuestro de carbono. El biocarbón posee alto contenido de carbono orgánico, altamente resistente a la descomposición, por lo que funciona como un almacén de formas recalcitrante de este elemento cuando aplicado al suelo como mejorador (Amonette, 2009) por lo que se puede considerar como un factor inhibidor del cambio climático (Granatstein *et al*., 2009). También disminuye las emisiones de óxido nitroso que es otro GEI (Gathorne *et al*., 2009).

Para tener un conocimiento concreto del potencial del biocarbón para retener carbono en el suelo por largo tiempo, se debe realizar un análisis de ciclo de vida del biocarbón. Para ello se debe considerar la eficiencia energética, las emisiones de GEI y otras evaluaciones del ambiente global asociadas a su elaboración. Este es un método que se usa para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad a lo largo de su vida útil, con la cuantificación de la energía, los recursos y las emisiones usados en su generación (Schahczenski, 2010). Mediante el análisis del ciclo de vida del biocarbón se ha podido demostrar que puede reducir las emisiones de GEI en diversas magnitudes, lo que depende del tipo de materia prima y de los sistemas de pirólisis empleados para producirlo (De Gryze *et al*., 2010). Otros estudios (Gaunt y Lehmann, 2008; Lehmann y Joseph, 2009; Cayuela *et al*., 2010; Roberts *et al*., 2010) reportan que el biocarbón sí conduce a una reducción neta en la emisión de GEI y que el uso de la biomasa es eficiente desde el punto de vista energético. Woolf *et al*. (2010) indican que es posible disminuir de las emisiones de carbono equivalente de CO_2 en el orden de 1.8 Pg CO_2-C_e anualmente, y 130 Pg CO_2-C_e en un siglo, considerando disponibilidad de materia prima para producir biocarbón, y preservando la biodiversidad, la estabilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria. Esta capacidad del biocarbón de contribuir al secuestro del carbono y disminuir los GEI requiere tecnologías adecuadas que respeten las áreas de cultivo, las selvas y bosques, de manera que no se genere un problema entre la seguridad alimentaria, la producción de biocombustibles y la conservación del ambiente (Tilman *et al*., 2009). Una estimación efectuada por la Iniciativa Internacional de Biochar (IBI, 2009) indica que si el 2.1% del carbono anual fotosintetizado e incorporado en las plantas pudiera usarse para producir biocarbón, con una eficiencia de carbonización del 40%, se podría secuestrar 0.5 mil millones de toneladas del carbono de la atmósfera.

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y Desertificación, en 2009, determinaron que el biocarbón podría ser considerado como una estrategia de mitigación para las negociaciones del segundo periodo del Protocolo de Kyoto que iniciará en 2013. Sin embargo, los cuestionamientos que todavía se tienen respecto al uso del biocarbón sugiere mayor investigación no sólo a nivel de laboratorio, sino que son imprescindibles los trabajos en campo (Bracmort, 2009; Shrestha *et al*., 2010).

Métodos de Aplicación al Suelo

Para aplicar biocarbón al suelo se deben considerar una serie de factores: (1) los relacionados con el suelo (tipo y erodabilidad), (2) prácticas de cultivo, (3) condiciones del entorno (clima, humedad), (4) la forma de aplicación (con maquinaria o manual, superficial a 0-30 cm o a mayor profundidad > 30 cm, en banda o cerca de las raíces), entre otras cosas. Puede aplicarse en forma de perdigones junto con otro tipo de mejoradores como abonos o compostas, y en ocasiones se requiere humedecerlo para evitar pérdidas en el aire y que sea aspirado por quien lo aplica. Las cantidades aplicadas deben estar basadas en resultados experimentales. Además, no es necesario aplicarlo repetidamente en un cultivo como en el caso de abonos o compostas, ya que su efecto perdura en el suelo debido a la recalcitrancia que exhibe el biocarbón (Major, 2010).

CONCLUSIONES

Esta revisión evidencia que el uso del biocarbón es una tecnología que ha demostrado proveer beneficios al suelo, aumentando su fertilidad a través de su influencia en sus propiedades físicas, químicas y biológicas; y presenta un alto potencial para ayudar al secuestro de carbono en el suelo. Ambos aspectos tienen gran futuro, en la medida que se tenga apoyo para probarlo en diferentes agroecosistemas de México. La factibilidad de su obtención podría llevarse a cabo directamente en el campo, aprovechando los residuos de las labores agrícolas, a los cuales bajo este enfoque se les confiere un valor agregado. En estas condiciones se disminuyen los costos de aplicación y se puede obtener mayor rentabilidad. A nivel mundial el estudio del biocarbón tiene mucho auge pues se considera una tecnología

que puede aumentar la fertilidad de los suelos y el rendimiento de los cultivos, de igual forma el secuestro de carbono, efecto positivo sobre el cambio climático y con potencial para la obtención de créditos de carbono. Sin embargo, falta mucho conocimiento respecto al efecto a largo plazo del uso del biocarbón en los suelos y en el ambiente, ya que la investigación a nivel de campo es todavía limitada. Asimismo, todavía se están desarrollando las técnicas para la caracterización de los biocarbones, aspecto indispensable para definir sus propiedades físicas, químicas, fisicoquímcas y biológicas, que son las que determinan su comportamiento en el suelo y su eficiencia en la mejora de la calidad de éste. Por otra parte, la infinita gama de agroecosistemas en el mundo, la gran diversidad de biocarbones por los parámetros empleados en su producción, las innumerables interrogantes respecto a las dosis y forma de aplicación del biocarbón, así como las diversas respuestas probables en cultivos y ambientes diferentes, hacen necesario el desarrollo de más investigación. En México es necesario impulsar esta tecnología para obtener los beneficios reportados en otras partes del mundo y para poder usarlo como mejorador de suelo. Para ello se requiere comprobar los resultados que muchos investigadores han generado, lo que permitirá transferir esta tecnología a los productores agrícolas de México.

LITERATURA CITADA

Akala, V. A. and R. Lal. 2001. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed Minesoils in Ohio. J. Environ. Qual. 30: 2098-2104.

Amonette, J. 2009. An introduction to biochar: Concept, processes, properties, and applications. Harvesting Clean Energy 9. Special Workshop. www.harvestcleanenergy.org/conference/HCE9/Post-conference/PPT/JeanAmonette.pdf. (Consulta: marzo 13, 2013).

Angin, D. and S. Sensoz. 2011. Characterización of bio-chars obtained at static and nitrogen atmosphere. pp. 191-193. *In:* 6th International Advanced Technologies Symposiym (IATS'11), Elazig, Turkey.

Antal, Jr. M. J. and M. Grønli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. Ind. Eng. Chem. Res. 42: 1619-1640.

Baccile, N., M. Antonietti, and M. M. Titirici. 2010. One-step hydrothermal synthesis of nitrogen-Doped nanocarbons: Albumine directing the carbonization of glucose. ChemSusChem 3: 246-253.

Baldock, J. A. and R. J. Smernik. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. Org. Geochem. 33: 1093-1109.

Bracmort, K. 2009. Biochar: Examination of an emerging concept to sequester carbon. Congressional Research Service. USDA. USA. http://www.eoearth.org/files/177501_177600/177531/r40186.pdf.

Brendová, K., P. Tlustos, J. Száková, and J. Habart. 2012. Biochar properties from different materials of plant origin. Eur. Chem. Bull. 1: 535-539.

Brick, S. 2010. Biochar: Assessing the promise and risks to guide U.S. policy. Natural Resources Defense Council. USA. http://www.nrdc.org/energy/files/biochar_paper.pdf.

Cayuela, M. L., P. J. Kuikman, O. Oenema, R. R. Bakker, and J. W. Groenigen. 2010. Bioenergy residues and biochar as soil amendments: Climate-relevant C and N dynamics during decomposition in soil. Use of manures and organic wastes to improve soil quality and nutrient balances. http://www.ramiran.net/ramiran2010/docs/Ramiran2010_0319_final.pdf.

Chan, K. Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. Aust. J. Soil Res. 45:629-634.

Chan, K. Y. and Z. H. Xu. 2009. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. pp. 67-84. *In*: J. Lehmann and S. Joseph (eds.). Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan. London, UK.

Cheng, C. H. and J. Lehmann. 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. Chemosphere 75: 1021-1027.

Cheng, C. H., J. Lehmann, and M. H. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. Geochim. Cosmochim. Acta. 72: 1598-1610.

Czernik, S. and A. V. Bridgwater. 2004. Overview of applications of biomass fast pyrolysis Oil. Eng. Fuels 18: 590-598.

De Gryze, S., D. M. Cullen, and L. Durschinger. 2010. Evaluation of the opportunities for generating carbon offsets from soil sequestration of biochar. Climate action reserve. Terra Global Capital. LLC. http://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2009/03/Soil_Sequestration_Biochar_Issue_Paper1.pdf.

Demirbas, M. F. 2009. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. Appl. Eng. 86: S151-S161.

Downie, A., A. Crosky, and P. Munroe. 2009. Physical properties of biochar. pp. 13-30. *In:* J. Lehmann and S. Joseph (eds.). Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan. London, UK.

Ernsting, A. and R. Smolker. 2009. Biochar for climate change mitigation: Fact of Fiction? pp. 1-10. *In:* www.biofuelwatch.org.uk/docs/biocharbriefing.pdf. (Consulta: julio 4, 2014).

Elad, Y., E. Cytrin, H. Y. Meller, B. Lew, and E. R. Graver. 2011. The biochar effect: Plant resistance to biotic stresses. Phytopathol. Mediterr. 50: 335-349.

Falcao, N. 2012. Pesquisadores garipam a história contida na terra preta de índio. Do Globo Natureza, com informações do Globo Rural (ed.). http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-de-indio.html.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2013. Major cuts of greenhouse gas emissions from livestock within reach. http://www.fao.org/news/story/en/item/197608/.

Farag, I. H., C. E. LaClair, and C. J. Barrett. 2002. Technical, enviromenmental and economic feasibility of bio-oil in New Hampshire's north country. New Hampshire Industrial Research Center. www.unh.edu/p2/biooil/bounhif.pdf.

Fortis H., M., E. Salazar, I. Orono, J. Leos, J. Cruz, J. A. Montemayor, J. A. García y R. A. Aldaco. 2007. Estadísticas de la producción orgánica. pp. 1-33. *In*: E. Salazar S., H. I. Trejo E., I. Orona C., C. Vázquez V., J. D. López M., M. Fortis H., A. Flores H., F. J. Sánchez R., J. A. Léos R. y F. Jiménez D. (eds.). Uso y aprovechamiento de abonos orgánicos e inocuidad. FAZ- UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, COCyTED. ISBN: 978-968-9304-13-5. Gómez Palacio, Durango, México.

Funes-Monzote, F. y M. Monzote. 2001. Unir en un todo coherente una opción sustentable y productiva. Experiencia cubana de integración ganadería-agricultura sobre bases agroecológicas. Boletín de ILEIA 16 : 22-24.

Gathorne-Hardy, A., J. Knight, and J. Woods. 2009. Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertilizer to improve barley yields in the UK. Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 6 (2009) 372052 doi:10.1088/1755-1307/6/7/372052.

Gaunt, J. L. and J. Lehmann. 2008. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. Environ. Sci.Technol. 42: 4152-4158.

Gaunt, J. L. and A. Cowie. 2009. Biochar, greenhouse gas accounting and emissions trading. pp. 317-340. *In:* J. Lehmann and S. Joseph (eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. ISBN: 9781844076581. Earthscan, London.

Gheorghe, C., C. Marculescu, A. Badea, C. Dinca, and T. Apostol. 2009. Effect of pyrolysis conditions on bio-char production from biomass. pp. 239-241. *In:* Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conf. on Renewable Energy Sources, July 1-3 2009. Tenerife Canary Island, Spain. ISBN: 978-960-474-093-2.

Glaser, B., L. Haumaier, G. Guggenberger, and W. Zech. 2001. The "terra preta" phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. Naturwissenschaften 88: 37-41.

Gorou, P. 1950. Observações geográficas na Amazônia. Rev. Brasil. Geog. 12: 171-250.

Granatstein, D., C. E. Kruger, H. Collins, S. Galinato, M. Garcia-Perez, and J. Yoder. 2009. Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment. Final report. Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources. Washington State University. Wenatchee, WA, USA.

Hammes, K., R. J. Smernick, J. O. Skjemstad, A. Herzog, U. Vogt, and M. W. I. Schmidt. 2006. Synthesis and characterization of laboratory-charred grass straw (*Oriza sativa*) and chesnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. Org. Geochem. 37: 1629-1633.

Hayes, D. J. 2009. An examination of biorefining processes, catalysts and challenges. Catalysis Today 145: 138-151.

Hernández, G. I., S. Salgado, D. Palma, L. del C. Lagunes, M. Castelán y O. Ruiz. 2008. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un Gleysol mólico de Chiapas, México. Interciencia. 33: 855-860.

Hiller, E., A. Fargasova, L. Zemanova, and M. Bartal. 2007. Influence of wheat ash on the MCPA inmobilization in agricultural soils. Bull. Environ. Contaminat. Toxicol. 79: 478-481.

INEGEI (Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero). 2009. ii. National greenhouse gas emissions inventory. Fourth National Communication of Mexico. 1990-2006. http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/654/nationalgreenhouse.pdf

IBI (International Biochar Initiative). 2012. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. www.biochar-international.org. Document reference code: IBI-STD-01.

IBI (International Biochar Initiative). 2009. How much carbon can biochar systems offset-and when? http://www.biochar-international.org/images/final_carbon.pdf.

Ippolito, J. A., R. D. Lentz, M. J. Novak, K. A. Spokas, H. P. Collins, and J. Streubel. 2011. Biochar usage: Pros and cons. Western Nutrient Management Conference. 9: 93-98. Reno, NV, USA.

Ishii, T and K. Kadoya. 1994. Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus growth and vesicular–arbuscular mycorrhizal development. J. Jap. Soc. Hortic. Sci. 63: 529-535.

Kaal, J., S. Brodowski, J. A. Baldock, K. G. J. Nierop, and A. Martínez C. 2008. Characterisation of aged black carbon using pyrolysis-GC/MS, thermally assisted hydrolysis and methylation (THM), direct and cross-polarisation 13C nuclear magnetic resonance (DP/CP NMR) and the benzenepolycarboxylic acid (BPCA) method. Org. Geochem. 39: 1415-1426.

Kern, D. C. e N. Kämpf. 1989. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta arqueológicas na região de Oriximiná-PA. Rev. Brasil. Ciên. Solo 13: 219-225.

Kimetu, J. M., J. Lehmann, S. O. Ngoze, D. N. Mugendi, J. M. Kinyangi, S. Riha, L. Verchot, J. W. Recha, and A. N. Pell. 2008. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. Ecosystems 11: 726-739.

Kishimoto, S. and G. Sugiura. 1985. Charcoal as soil conditioner. Int. Achieve. Future 5: 12-23.

Krull, E., R. Kookana, R. Smernik, A. McBeath, S. Jahanshahi, J. McGowan, S. Donne, and J. Lehmann. 2010. Agronomic and environmental implications of biochar sourcing, production and application. 3rd International Biochar Conference IBI 2010 Progressing from Terra Preta de Indois to the Whole World. International Biochar Initiative. Identifier: EP104238. Rio de Janeiro.

Laird, D. A., R. Brown, J. Amonette, and J. Lehmann. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. Biofpr 3: 547-562.

Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. Front. Ecol. Environ. 5: 381-387.

Lehmann, J., J .P. da Silva Jr., C. Steiner, T. Nehls, W. Zech, and B. Glaser. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. Plant Soil 249: 343-357.

Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management. Science and technology. Earthscan. UK-USA.

Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, J.O. Skjemstad, J. Thies, F.J. Luizao, J. Petersen, and G. Neves. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 1719-1730.

Major, J. 2010. Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various soil management systems. International Biochar Initiative. www.biochar-international.org.

Major, J. 2011. Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more. A literature review. http://biochar-atlantic.org/assets/pdf/BiocharSoilFertility.pdf.

Manya, J. J. 2012. Pyrolysis for biocarbón purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. Environ. Sci. Technol. 46: 7939-7954.

Martínez, E., J. P. Fuentes, and E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. J. Soil Sc. Plant Nutr. 8: 68-96.

Martínez, M. L., M. M. Torres, C. A. Guzmán, and D. M. Maestri. 2006. Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells. Ind. Crops Prod. 23: 23-28.

Mašek, O. and P. Brownsort. 2011. Biochar Production. pp. 37-44. *In*: S. Shackley and S. Sohi (eds.). An Assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil. UK Biochar Research Centre. UK.

Masera, O., M. J. Ordóñez, and R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: Current situation and long-term scenarios. Clim. Change 35: 265-295.

McClellan, T., J. Deenik, G. Uehara, and M. Antal. 2007. Effects of flashed carbonized macadamia nutshell charcoal on plant and soil. The ASA-CSSA-SSSA Intenational Annual Meetings. New Orleans, LA, USA. http://www.ctahr.hawaii.edu/deenikj/Downloads/Tai_Charcoal_CTAHR_Sym_2007.pdf.

McHenry, M. P. 2009. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. Agric. Ecosyst. Environ. 129: 1-7.

McLaughlin, H., P. S. Anderson, F. E. Shields, and T. B. Reed. 2009. All biochars are not created equal, and how to tell them apart. North American Biochar Conference. Boulder, CO http://www.biochar-international.org/sites/default/files/All-Biochars--Version2--Oct 2009.pdf.

Mills, E. 2012. Weighing the risks of climate change mitigation strategies. Bull. Atomic Sci. 68: 67-78.

Mullen, Ch. A., A. A. Boateng, K. B. Hicks, N. M. Goldberg, and R. A. Moreau. 2010. Analysis and comparison of bio-oil produced by fast pyrolysis form three barley biomass/byproduct streams. Eng. Fuels 24: 699-706.

Neves, E. G., J. B. Petersen, R. N. Bartone, and C. A. da Silva. 2003. Historical and socio-cultural origins of Amazonian dark earths. pp. 29-35. *In:* J. Lehmann, W. I. Woods, W. G. Teixeira, C. Steiner, A. M. G. A. WinlerPrins, and L. Rebellato (eds.). Amazonian dark earths: Origin, properties, management. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

Novak, J. M., I. Lima, B. Xing, W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrah, D.W. Watts, W. J. Busscher, and H. Schomberg. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. Ann. Environ. Sci. 3: 195-206.

Novak, J. M., W. J. Busscher, D. W. Watts, D. A. Laird, M .A. Ahmedna, and M. A. S. Niandou. 2010. Short-term CO_2 mineralization after additions of biochar and switch grass to a Typic Kandiudult. Geoderma 154: 281-288.

Orlando, P. 2012. Pesquisadores garipam a história contida na terra preta de índio. Natureza. http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-de-indio.html

Pastor-Villegas, J., C. Valenzuela-Calahorro, A. Bernalte-Garcia, and V. Gomez-Serrano. 1993. Characterization study of char and activated carbon prepared from raw and extracted rockrose. Carbon 31: 1061-1069.

Qiu, S., A. J. McComb, and R. W. Bell. 2008. Ratios of C, N and P in soil water direct microbial immobilization–mineralization and N availability in nutrient amended sandy soils in southwestern Australia. Agric. Ecosyst. Environ. 127: 93-99.

Roberts, K. G., B. A. Gloy, S. Joseph, N. R. Scott, and J. Lehmann. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic and climate change potential. Environ. Sci. Technol. 44: 827-833.

Rondon, M. A., J. Lehmann, J. Ramírez, and M. Hurtado. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. Biol. Fertil. Soils 43: 699-708.

Rouquerol, F., I. Rouquerol, and K. Sing. 1999. Adsorption by powders and porous solids. Academic Press. ISBN: 978-0-12-598920-6. London, UK.

Sadaka, S. 2007. 2. PYROLYSIS. Center for sustainable enviromental technologies. Departament of Agricultural and Biosystems Engineering. Iowa State University. Nevada. http://bioweb.sungrant.org/NR/rdonlyres/57BCB4D0-1F59-4BC3-A4DD-4B72E9A3DA30/0/Pyrolysis.pdf.

Sánchez, S., M. Hernández, and F. Ruz. 2011. Alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. Pastos Forrajes. 34: 375-392.

Schaczenski, J. 2010. Biochar and Sustainable Agriculture. pp. 1-12. *In*: H. Michels (ed.). National Sustainable Agriculture Information Service www.attra.ncar.org/attra-pub/biochr.html or www.attra.ncat.org/attra-pub/PDF/biochar.pdf.

Schmidt, M. W. I. and A. G. Noack. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. Global Biogeochem. Cycles 14: 777-793.

Schmidt, H. P. and K. Wilson. 2014. The 55 uses of biochar, the Biochar Journal 2014, Arbaz, Switzerland. ISSN 2297-1114. www.biochar-journal.org/en/ct/2. Version of 12 th May 2014. Accessed: 07.07.2016

SEMARNAT-Colpos (Secretería de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados). 2003. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.

Sheil, D., I. Basuki, L. German, T. W. Kuyper, G. Limberg, R. K. Puri, B. Sellato, M. van Noordwijk, and E. Wollenberg. 2012. Do anthropogenic dark earths occur in the interior of borneo? Some initial observations from East Kalimantan. Forests 3: 207-209.

Shrestha, G., S. J. Traina, and C. W. Swanston. 2010. Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review. Sustainability 2: 294-320.

Skjemstad, J., D. Reicosky, A. Wilts, and J. McGowan. 2002. Charcoal carbon U.S. agricultural soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1249-1255.

Smith, N. J. H. 1980. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. Ann. Assoc. Am. Geograp. 70: 553-566.

Sohi, S., E. Lopez-Capel, E. Krull, and R. Bol. 2009. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 64 pp. http://www.csiro.au/files/files/poei.pdf

Sohi, S. P., E. Krull, E. Lopez-Capel, and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. Adv. Agron. 105: 47-82.

Sombroek, W. 1966. Amazon Soil: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Centre for Agricultural Publications and Documentation. Wageningen, Netherlands.

Sombroek, W. G., F. O. Nachtergaele, and A. Hebel. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. Ambio 22: 417-426.

Srinivasarao, Ch., K. A. Gopinath, G. Venkatesh, A. K. Dubey, H. Wakudkar, T. J. Purakayastha, H. Pathak, P. Jha, B. L. Lakaria, D. J. Rajkhowa, S. Mandal, S. Jeyaraman, B. Venkateswarlu, and A. K. Sikka. 2013. Use of biochar for soil health management and greenhouse gas mitigation in India: Potential and constraints. Central Research Institute for Dryland Agriculture. Hyderabad, Andhra Pradesh.

Steiner, C. 2010. Biochar in agricultural and forestry applications in: Biochar from Agricultural and Forestry Residues – A complimentary use of "waste" biomass. pp. 1-14. *In*: J. Levine (ed.). Assessment of Biochars Benefits for the USA. Boulder, CO, USA.

Steiner, C., K. C. Das, N. Melear, and D. Lakely. 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. J. Environ. Qual. 39: 1236-1242.

Tilman, D., R. Socolow, J. A. Foley, J. Hill, E. Larson, L. Lynd, S. Pacala, J. Reilly, T. Searchinger, C. Somerville, and R. Williams. 2009. Beneficial biofuels - the food, energy, and enviroment trilemma. Science 325: 270-271.

Titirici, M. M., A. Thomas, and M. Antonietti. 2007. Back in the black: Hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO_2 problem? New J. Chem. 31: 787-789.

Toledo, E., J. A. Cabrera, A. Leyva y H. A. J. Pohlan. 2008. Estimación de la producción de residuos agrícolas en agroecosistemas de caña de azúcar. Cult. Trop. 29: 17-21.

Unger, R. and R. Killorn. 2011. Effect of the application of biochar on selected soil chemical properties, corn grain, and biomass yields in Iowa. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 42: 2441-2451.

Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K. Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph, and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plan Soil. 327: 235-246.

Verheijen, F. G. A., S. Jeffery, A. C. Bastos, M. van der Velde, and I. Diafas. 2009. Biochar application to soils - A critical scientific review of effects on soil properties. Processes and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities. Luxembourg.

Woods W. I. and J. M. McCann. 1999. The anthropogenic origin and persistence of amazonian dark earths. Yearbook. Conference of Latin Americans Geographers 25: 7-14.

Woods, W. I. 2004. Development of anthrosol research. pp. 1-14. *In*: J. Lehman, D. C. Kern, B. Glaser, and W. I. Woods (ed.). Amazonian Dark Earths. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

Woods, W. I. and B. Glaser. 2004. Amazonian dark earths: Explorations in space and time. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Woolf, D., J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nat. Commun. 1: 56.

Yamoah, C. F., A. Bationo, B. Shapiro and S. Koala. 2002. Trend and stability of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. Field Crops Res. 75: 53-62.

Zheng, H., Z. Wang, X. Deng, S. Herbert, and B. Xiang. 2013. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. Geoderma 206: 32-39.